Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 17, No. 3, Fall. 2019, p. 503-515

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸، ص. ۵۱۵-۵۰۳

مقایسه محلول‌پاشی نانوذرات سیلیس و روی با مصرف خاکی بر صفات زراعی و فیزیولوژیکی برنج (*Oryza sativa* L.)

نوراله خیری[1*]، حسین عجم نوروزی[2]، حمیدرضا مبصر[3]، بنیامین ترابی[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۱۳

چکیده

به‌منظور بررسی اثر سیلیس و روی به دو فرم محلول‌پاشی (منبع نانوذرات) و خاک-مصرف (منبع معمولی) در قالب تیمارهای انفرادی یا ترکیبی بر صفات زراعی و فیزیولوژیکی برنج (*Oryza sativa* L.)، آزمایش مزرعه‌ای به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۶ تیمار و سه تکرار در دو منطقه از استان مازندران (آمل و نور) در سال ۱۳۹۵ اجرا شد. نتایج نشان داد که اجزای عملکرد، عملکرد و هم‌چنین غلظت و جذب سیلیس و روی در دانه برنج با کاربرد سیلیس و روی به هر دو روش محلول‌پاشی نانوذرات و خاک-مصرف به‌طور معنی‌داری در مقایسه با شاهد افزایش یافت. کاربرد ترکیبی سیلیس و روی به‌صورت خاک-مصرف برتری معنی‌داری نسبت به مصرف جداگانه هر دو عنصر مورد استفاده در آزمایش از نظر تعداد پنجه بارور در کپه در منطقه آمل و تعداد دانه‌های پر در خوشه در منطقه نور داشت. از نظر محلول‌پاشی نانوذرات، کاربرد ترکیبی سیلیس و روی برتر از استفاده جداگانه سیلیس از نظر تعداد پنجه بارور در هر دو مکان آزمایش و میزان غلظت و جذب روی در دانه برنج بود. بنابراین با توجه به نتایج تحقیق حاضر، استفاده از سیلیس و روی به هر دو روش محلول‌پاشی نانوذرات و خاک-مصرف جهت افزایش غلظت و جذب این عناصر و هم‌چنین بهبود عملکرد دانه برنج در خاک‌هایی که قابلیت دسترسی پایینی به این دو عنصر غذایی دارند مؤثر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جذب عناصر، روش مصرف، عملکرد دانه، منبع مصرف، نانوکود

مقدمه

در بین عناصر غذایی، سیلیس و روی نقش کلیدی در بهبود تغذیه گیاه و افزایش رشد برنج (*Oryza sativa* L.) دارند به گونه‌ای که کمبود این عناصر سبب کاهش رشد و متعاقب آن کاهش عملکرد می‌گردد (Sainz *et al*., 1998; Jeer *et al*., 2017). سیلیس یکی از فراوان‌ترین عناصر خاک می‌باشد که به مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی و هم‌چنین بهبود خصوصیات خاک کمک می‌کند (Mahmoud *et al*., 2017). سیلیس خاک فواید متعددی برای برنج شامل افزایش میزان فتوسنتز، بهبود عملکرد، جلوگیری از ورس، کاهش میزان آفات و بیماری‌ها (Jeer *et al*., 2017) و کاهش اثرات منفی اشعه ماوراء بنفش در فرآیند فتوسنتز و تعرق (Lou *et al*., 2016) دارد. اثرات مثبت سیلیس با کاربرد آن در طی مرحله رشد زایشی بر افزایش میزان باروری پنجه و خوشه در برنج (Tamai and Ma, 2008)، هم‌چنین بهبود فتوسنتز و تولید برنج (Lavinsky *et al*., 2016) مشخص گردیده است. افزایش غلظت سیلیس در بافت گیاه با مصرف بیشتر کود سیلیس در نتایج محققان گزارش شده است (Zia *et al*., 2017). گزارشات حاکی از آن است که با محلول‌پاشی نانوسیلیس، میزان سیلیس دانه برنج به‌طور معنی‌داری نسبت به کاربرد خاکی سیلیس افزایش یافته است (Yazdpour *et al*., 2014). بنابراین، بهبود مدیریت مصرف سیلیس جهت افزایش عملکرد و تولید محصول پایدار در مناطق معتدل و هم‌چنین کشورهای گرمسیری امری ضروری به‌نظر می‌رسد (Meena *et al*., 2014).

کمبود روی در برنج به‌طور وسیعی در بسیاری از مناطق برنج‌خیز دنیا گزارش شده است (Tiong *et al*., 2014). روی، یکی از عناصر مهم ریزمغذی است که در سنتز پروتئین و متابولیسم کربوهیدرات‌ها مشارکت دارد و جزء اصلی آنزیم کربنیک آنهیدراز است که در حلالیت مولکول دی‌اکسید کربن و در نهایت فتوسنتز نقش مهمی دارد (Sainz *et al*., 1998). اثرات مثبت کاربرد کود روی در افزایش رشد، بهبود عملکرد (Dwivedi and Srivastva, 2014) و افزایش میزان غلظت و جذب روی در دانه برنج (Shivay *et al*., 2016; Farooq *et al*., 2018) در نتایج محققان گزارش شده است.

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه زراعت، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران
۲- استادیار، گروه زراعت، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران
۳- استادیار، گروه زراعت، واحد قائمشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائمشهر، ایران
۴- دانشیار، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: norollah.kheyri@yahoo.com)
DOI: 10.22067/gsc.v17i3.80028

بررسی‌های به‌عمل آمده توسط محققان نشان داد که مصرف هم‌زمان روی به‌صورت خاک-مصرف و محلول‌پاشی تأثیر مثبتی بر افزایش غلظت روی دانه برنج و بهبود عملکرد دانه دارد (Saha *et al.*, 2017). محققان گزارش نمودند که نانواکسید روی به دلیل این که عناصر غذایی را به کندی و به‌تدریج در طول دوره‌های بحرانی و حساس رشد گیاه آزاد می‌کند منجر به بهبود رشد برنج می‌گردد (Yuvaraj and Subramanian, 2014).

افزایش تقاضا به علت افزایش جمعیت از یک طرف و کاهش منابع آب و زمین موجود در زراعت برنج از طرف دیگر، اهمیت گسترش و استفاده از روش‌های نوین در دستیابی به عملکرد بیشتر در واحد سطح را افزایش داده است (Longping, 2004). یکی از این روش‌های نوین، استفاده از فناوری نانو در بخش کشاورزی می‌باشد. از مهمترین کاربردهای نانوتکنولوژی در جنبه‌های مختلف کشاورزی در بخش آب و خاک، استفاده از نانوکودها برای تغذیه گیاهان می‌باشد (Rezaei *et al.*, 2009). کاربرد مواد نانو می‌تواند سبب تسریع در جوانه‌زنی گیاه، بهبود مقاومت به تنش‌های زنده و غیرزنده، افزایش کارآیی مصرف عناصر غذایی، افزایش رشد گیاه و هم‌چنین کاهش اثرات زیست‌محیطی در مقایسه با روش‌های سنتی به‌کار گرفته شده گردد (Alharby *et al.*, 2016). نانوکودها در مقایسه با کودهای متداول شیمیایی، راندمان مصرف بالاتری دارند و می‌توانند به‌صورت مطلوب در نقطه مناسبی از ناحیه رشد، عناصر غذایی خود را آزاد کنند که این عمل اثر معنی‌داری را در خصوصیات رشدی گیاهان ایجاد می‌کند (Mazaherinia *et al.*, 2010). هدف از انجام این پژوهش بررسی اثرات سیلیس و روی به دو فرم محلول‌پاشی نانوذرات و خاک-مصرف به منظور افزایش کارآیی جذب عناصر غذایی و بهبود عملکرد دانه محصول برنج بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت دو آزمایش مجزا در دو منطقه آمل و نور در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۶ تیمار و سه تکرار در سال ۱۳۹۵ اجرا گردید. زمین زراعی واقع در شهرستان آمل با مختصات جغرافیایی ۵۲ درجه و ۱۹ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۴ دقیقه عرض شمالی در ارتفاع ۱۷۰ متری از سطح دریا و زمین زراعی واقع در منطقه نور با مختصات جغرافیایی ۵۲ درجه و ۲۸ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی در ارتفاع ۷۱ متری از سطح دریا قرار گرفته است. آمار هواشناسی مکان‌های اجرای آزمایش در طول فصل رشد برنج در جدول ۱ ارائه گردیده است. نمونه‌برداری از خاک‌های مناطق اجرای آزمایش در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری انجام و مشخص گردید که بافت خاک در مناطق آمل و نور به‌ترتیب از نوع رسی و لومی بود (جدول ۲).

جدول ۱- داده‌های هواشناسی ثبت شده در طول دوره رشد برنج در دو مکان اجرای آزمایش (دوره شش ماهه از فروردین تا شهریور ۹۵)

Table 1- Meteorological data recorded during the rice-growing seasons in two experimental locations (Six month period from March to September 2016)

ماه‌های سال Month of the year	مکان Location	متوسط درجه حرارت ماهانه Average of monthly temperature (°c)	متوسط رطوبت نسبی ماهانه Average of monthly relative humidity (%)	مجموع بارندگی ماهانه Total monthly rainfall (mm)	مجموع ساعات آفتابی Total sunny hours (hr)
فروردین	Amol	14.7	77	99.3	123.6
March-April	Nour	13.8	80	129.8	121.1
اردیبهشت	Amol	20.6	78	41.4	140.9
April-May	Nour	18.5	84	43.0	159.3
خرداد	Amol	23.8	80	24.6	232.8
May-June	Nour	22.7	79	27.7	260.8
تیر	Amol	26.5	79	39.6	203.0
June-July	Nour	25.7	78	179.9	208.9
مرداد	Amol	27.8	76	11.4	232.5
July-August	Nour	26.7	79	46.1	251.1
شهریور	Amol	26.3	78	88.5	193.0
August-September	Nour	25.6	78	182.6	205.9

جدول ۲- خصوصیات خاک مکان‌های آزمایشی در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری

Table 2- Soil properties of the experimental sites in depth of 0-30 cm

مکان Location	بافت خاک Soil Texture	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	شن Sand (%)	pH	EC ($ds.m^{-1}$)	SP (%)	O.C (%)	O.M (%)	P ($mg.kg^{-1}$)	K ($mg.kg^{-1}$)	Zn ($mg.kg^{-1}$)	Si (%)
Amol	Clay	37	45	18	7.30	1.59	82	1.84	3.17	12.3	184	0.98	0.44
Nour	Loam	44	20	36	7.51	3.02	63	1.66	2.86	10.5	116	0.81	0.28

جدول ۳- مشخصات تیمارهای آزمایشی مورد مطالعه
Table 3- Characteristics of the experimental treatments studied

	تیمارهای آزمایشی (Experimental treatments)
T1	شاهد (Control)
T2	کاربرد خاکی سیلیکات کلسیم (Soil application of calcium silicate)
T3	کاربرد خاکی سولفات روی (Soil application of zinc sulphate)
T4	کاربرد خاکی سیلیکات کلسیم + کاربرد خاکی سولفات روی (Soil application of calcium silicate + zinc sulphate)
T5	محلول‌پاشی نانودی‌اکسید سیلیس (Foliar application of nano-SiO_2)
T6	محلول‌پاشی نانودی‌اکسید سیلیس + کاربرد خاکی سیلیکات کلسیم (Foliar application of nano-SiO_2 + soil application of calcium silicate)
T7	محلول‌پاشی نانودی‌اکسید سیلیس + کاربرد خاکی سولفات روی (Foliar application of nano-SiO_2 + soil application of zinc sulphate)
T8	محلول‌پاشی نانودی‌اکسید سیلیس + کاربرد خاکی سیلیکات کلسیم + کاربرد خاکی سولفات روی (Foliar application of nano-SiO_2 + soil application of calcium silicate + zinc sulphate)
T9	محلول‌پاشی نانواکسید روی (Foliar application of nano-ZnO)
T10	محلول‌پاشی نانواکسید روی + کاربرد خاکی سیلیکات کلسیم (Foliar application of nano-ZnO + soil application of calcium silicate)
T11	محلول‌پاشی نانواکسید روی + کاربرد خاکی سولفات روی (Foliar application of nano-ZnO + soil application of zinc sulphate)
T12	محلول‌پاشی نانواکسید روی + کاربرد خاکی سیلیکات کلسیم + کاربرد خاکی سولفات روی (Foliar application of nano-ZnO + soil application of calcium silicate + zinc sulphate)
T13	محلول‌پاشی نانودی‌اکسید سیلیس + محلول‌پاشی نانواکسید روی (Foliar application of nano-SiO_2 + nano-ZnO)
T14	محلول‌پاشی نانودی‌اکسید سیلیس + محلول‌پاشی نانواکسید روی + کاربرد خاکی سیلیکات کلسیم (Foliar application of nano-SiO_2 + nano-ZnO+ soil application of calcium silicate)
T15	محلول‌پاشی نانودی‌اکسید سیلیس + محلول‌پاشی نانواکسید روی + کاربرد خاکی سولفات روی (Foliar application of nano-SiO_2 + nano-ZnO + soil application of zinc sulphate)
T16	محلول‌پاشی نانودی‌اکسید سیلیس + محلول‌پاشی نانواکسید روی + کاربرد خاکی سیلیکات کلسیم + کاربرد خاکی سولفات روی (Foliar application of nano-SiO_2 + nano-ZnO + soil application of calcium silicate + zinc sulphate)

رقم مورد استفاده در این آزمایش طارم هاشمی بود. جهت اجرای عملیات طرح، ابتدا زمین خزانه بر اساس عرف محل (پوشش پلاستیکی) آماده و سپس بذرپاشی در آن انجام شد. مزارع محل آزمایش در سال‌های زراعی قبل نیز زیر کشت برنج بود. در اواخر بهمن ماه، زمین توسط گاو آهن برگردان‌دار شخم زده شد و در نیمه دوم اردیبهشت عملیات کامل شامل شخم بهاره، ماله‌کشی و تسطیح انجام گردید. سپس، زمین آزمایش به ۴۸ کرت مساوی تقسیم شد که ابعاد هر کرت ۲×۵ متر مربع بود. برای جلوگیری از تبادل کودی بین تیمارهای مختلف، مرز بین کرت‌ها به عرض و عمق ۴۰ سانتی‌متر با پوشش پلاستیکی عایق‌بندی شد. بعد از خزانه‌گیری، نشاها در مرحله ۴-۳ برگی و زمانی که ارتفاع آنها به ۲۵ سانتی‌متر رسید به زمین اصلی انتقال یافتند و نشاکاری با فواصل ۲۰×۲۰ سانتی‌متر و به تعداد چهار نشا در هر کپه انجام گرفت. نشاکاری در هر دو منطقه اجرای طرح در اواخر اردیبهشت ماه انجام گردید. کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل به مقدار ۷۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت پایه و کود نیتروژن از منبع اوره به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار در سه مرحله به‌صورت تقسیط (یک سوم در زمان کاشت، یک سوم در زمان پنجه‌زنی و یک سوم در زمان خوشه‌رفتن) و با توجه به نتایج تجزیه خاک به‌صورت یکنواخت در کلیه کرت‌ها در مکان‌های اجرای طرح مصرف شد. کود پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار برای منطقه آمل و به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار برای منطقه نور به صورت پایه و بر اساس نتایج آنالیز خاک به کرت‌های آزمایش اضافه گردید. جهت کاربرد خاکی عناصر سیلیس و روی، کود سیلیس از منبع سیلیکات کلسیم به مقدار ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار (Yazdpour, 2014) و کود روی از منبع سولفات روی به میزان ۴۰ کیلوگرم در هکتار با توجه به تیمارهای تعریف شده به‌صورت پایه در کرت‌های آزمایش مصرف شد. محلول‌پاشی نانوسیلیکون و نانواکسید روی به مقدار ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر (Ghasemi *et al*., 2017; Upadhyaya *et al*., 2017) در چهار مرحله مهم و حساس از رشد گیاه (ابتدای پنجه‌زنی، اواسط پنجه‌زنی، ظهور خوشه‌آغازین و مرحله خوشه‌دهی کامل) در کرت‌های مورد نظر انجام شد. هم‌چنین، در تیمارهای ترکیبی که هر دو منبع سیلیس مورد استفاده قرار گرفت مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات کلسیم و زمانی که هر دو منبع روی در کرت‌های مورد نظر به‌کار گرفته شد مقدار ۲۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی مصرف گردید. کودهای نانوسیلیکون و نانواکسید روی مورد استفاده در آزمایش تولید شرکت تحقیقات نانومواد آمریکا (US Research Nanomaterials, Inc.) بود که از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه گردید (جدول ۴).

جدول ٤- خصوصیات نانوذرات دی‌اکسید سیلیس و اکسید روی

Table 4- Analysis of silicon dioxide (SiO_2) and zinc oxide (ZnO) nanoparticles

نانوذرات NPs	درصد خلوص Purity percentage (%)	اندازه ذرات Particles size (nm)	تراکم واقعی True density($g.cm^{-3}$)	رنگ Color
SiO_2	>99%	20-30	2.4	white
ZnO	>99%	10-30	5.606	Milky white

طی مراحل داشت برای کنترل علف‌های هرز، دو مرتبه وجین دستی در طی ۱۴ و ۲۸ روز بعد از نشاکاری و برای مبارزه شیمیایی با آن، سم‌پاشی با سم بوتاکلر (ماچتی) به غلظت ۳/۵ لیتر در هکتار یک هفته پس از نشاکاری انجام شد. هم‌چنین، برای مبارزه با کرم ساقه‌خوار برنج از حشره‌کش دیازینون (گرانول ۱۰ درصد) به میزان ۱۵ کیلوگرم در هکتار در مراحل حداکثر پنجه‌زنی و خوشه‌دهی استفاده گردید. در زمان رسیدگی فیزیولوژیک، بعد از حذف اثرات حاشیه‌ای در هر کرت، صفات مختلف زراعی به‌صورت تصادفی در هر یک از کرت‌های آزمایش اندازه‌گیری شد. تعیین طول خوشه با اندازه‌گیری از روی ۱۲ بوته در هر کرت انجام گرفت. تعداد پنجه‌های بارور در کپه با شمارش از روی ۱۲ کپه در هر کرت، تعداد دانه پر در خوشه با شمارش از روی ۲۰ خوشه در هر کرت و وزن هزار دانه با شمارش ۱۰۰۰ دانه سالم و پر با استفاده از دستگاه شمارشگر بذر اتوماتیک (PFEUFFER, Germany) و توزین آن به‌وسیله ترازوی حساس با دقت ۰/۰۰۱ بر اساس رطوبت ۱۴ درصد و بر حسب گرم تعیین گردید. جهت تعیین عملکرد دانه (شلتوک)، مساحت چهار مترمربع از وسط هر کرت آزمایش را با رعایت حذف اثر حاشیه برداشت نموده و پس از خرمن‌کوبی و جداسازی دانه از کاه، عملکرد دانه بر مبنای رطوبت ۱۴ درصد محاسبه شد. برای تعیین میزان غلظت عناصر غذایی در برنج، از هر کرت به مقدار ۲۰ گرم نمونه دانه با رطوبت ۱۴ درصد به آزمایشگاه ارسال شد. اندازه‌گیری سیلیس گیاه با روش یوشیدا (Yoshida, 1975) و با استفاده از دستگاه کوره الکتریکی (تولید شرکت ایران خودساز، ساخت ایران) و اندازه‌گیری روی در گیاه با روش جذب اتمی شعله‌ای (A.A.S[1]) (Emami, 1996) و با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل Thermo electron, USA) انجام شد. پس از تعیین میزان غلظت عناصر اندازه‌گیری شده در دانه برنج، با استفاده از حاصلضرب تجمع ماده خشک در دانه در غلظت‌های مربوط به آن، میزان جذب سیلیس در دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار و میزان جذب روی در دانه برنج بر حسب گرم در هکتار محاسبه گردید. تجزیه واریانس مرکب داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت. رسم نمودارها توسط نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

طول خوشه

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد طول خوشه تحت تأثیر مکان و روش‌های کاربرد سیلیس و روی ($P<0/01$) معنی‌دار شد، ولی اثرات متقابل مکان و تیمارهای آزمایش اثر معنی‌داری بر صفت مذکور نداشت (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر مکان نشان داد میانگین طول خوشه در منطقه نور (۲۵/۲۶ سانتی‌متر) بیشتر از آمل (۲۴/۵۷ سانتی‌متر) بود (شکل ۱). مقایسه میانگین اثرات تیمارهای آزمایش نشان داد بلندترین طول خوشه به‌ترتیب با میانگین‌های ۲۵/۶۳، ۲۵/۷۲، ۲۵/۵۸ و ۲۵/۵۲ سانتی‌متر در تیمارهای T13، T14، T15 و T16 مشاهده شد، اگرچه با سایر تیمارهای آزمایش به‌جز کاربرد جداگانه روی و سیلیس به‌صورت خاک-مصرف و شاهد اختلاف آماری معنی‌داری نداشت. کوتاه‌ترین طول خوشه با میانگین ۲۲/۵۲ سانتی‌متر تحت شرایط شاهد یا عدم مصرف سیلیس و روی (T1) حاصل شد (جدول ۶). اگرچه طول خوشه یک صفت ژنتیکی است ولی تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی از جمله میزان تشعشع و مواد غذایی نیز قرار می‌گیرد (Kheyri and Mobasser, 2016)، به گونه‌ای که در تحقیق حاضر نیز با افزودن عناصر غذایی سیلیس و روی بر مقدار این صفت افزوده گردید. کاربرد ترکیبی سیلیس و روی به‌صورت خاک-مصرف (T4) اثرات بهتری در افزایش طول خوشه در مقایسه با مصرف خاکی سیلیس به‌صورت جداگانه (T2) و شاهد (T1) داشت ولی اختلاف معنی‌داری با مصرف خاکی روی به‌صورت انفرادی (T3) نداشت. تفاوت آماری معنی‌داری بین کاربرد ترکیبی و جداگانه روی و سیلیس با استفاده از روش محلول‌پاشی نانوذرات وجود نداشت. تفاوتی در طول خوشه با محلول‌پاشی روی (T9) در مقایسه با کاربرد خاکی روی (T3) ایجاد نشد ولی محلول‌پاشی نانوسیلیس (T5) سبب افزایش معنی‌دار طول خوشه در مقایسه با کاربرد خاکی سیلیس (T2) گردید (جدول ۶). گزارشات حاکی از آن است که مصرف عناصر غذایی از جمله روی سبب افزایش طول خوشه می‌گردد (Anzer-Alam and Kumar, 2015). قاسمی لمراسکی و همکاران (Ghasemi Lemraski *et al*., 2014) با بررسی اثرات سیلیس بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج گزارش دادند که محلول‌پاشی نانوسیلیس سبب افزایش ۱/۴ درصدی طول خوشه در مقایسه با عدم مصرف سیلیس گردید.

1- Atomic Absorption Spectrophotometer

جدول ۵- تجزیه واریانس مرکب اجزای عملکرد و عملکرد دانه برنج تحت تأثیر تیمارهای آزمایش

Table 5- Combined analysis of variance for yield components and grain yield of rice affected by experimental treatments

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی d.f	طول خوشه Panicle length	تعداد پنجه بارور در کپه No. of fertile tillers $hill^{-1}$	تعداد دانه پر در خوشه No. of filled grains $panicle^{-1}$	وزن هزار دانه 1000-grain weight	عملکرد دانه Grain yield
مکان (Location)	1	11.4^{**}	14.1^{ns}	27.6^{ns}	0.09^{ns}	1035218.3^{ns}
خطا (Error)	4	0.3	1.962	57.3	0.17	172940.0
تیمار (Treatment)	15	4.4^{**}	10.02^{**}	63.5^{*}	0.11^{ns}	427350.6^{**}
مکان × تیمار (L×T)	15	0.9^{ns}	3.7^{**}	57.1^{*}	0.18^{ns}	133017.5^{ns}
خطا (Error)	60	0.6	1.5	28.1	0.51	144124.9
ضریب تغییرات CV (%)	-	3.3	7.4	5.8	2.8	8.9

ns، * و **: به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

ns, * and **: Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively

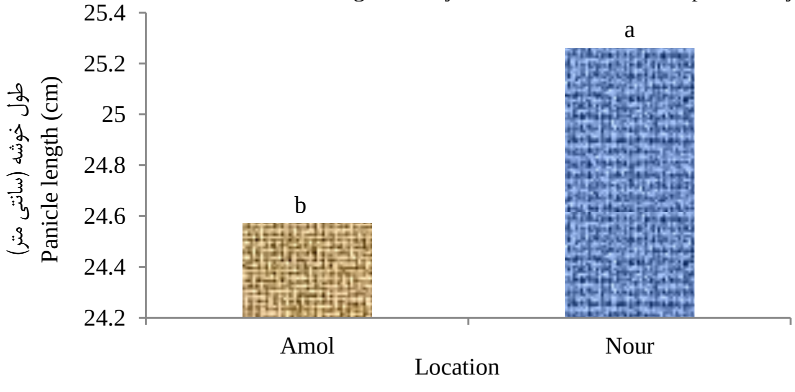
جدول ٦- مقایسه میانگین طول خوشه و عملکرد دانه برنج تحت تأثیر تیمارهای آزمایش

Table 6- Mean comparison of panicle length and grain yield of rice under the influence of experimental treatments

تیمارها Treatments	طول خوشه Panicle length (cm)	عملکرد دانه Grain yield ($kg.ha^{-1}$)
T1	22.52	3632
T2	23.50	3948
T3	24.10	4023
T4	24.93	4371
T5	24.97	4081
T6	24.75	4263
T7	25.17	4462
T8	25.43	4580
T9	25.22	4253
T10	25.38	4477
T11	25.02	4373
T12	25.25	4233
T13	25.63	4623
T14	25.72	4643
T15	25.58	4283
T16	25.52	4316
$LSD_{5\%}$	1.358	620.0

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند

Means followed by similar letters in each column are not significantly different at 5% level of probability according to LSD test



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر مکان بر طول خوشه برنج

Figure 1- Mean comparison of the effect of location on panicle length of rice

تعداد پنجه بارور در کپه

نتایج تجزیه مرکب مکان‌های آزمایش نشان داد اثر مکان بر تعداد پنجه بارور در کپه معنی‌دار نشد ولی صفت مذکور تحت تأثیر تیمارهای آزمایش و هم‌چنین اثر متقابل مکان و تیمارهای آزمایش (P<۰/۰۱) قرار گرفت (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین‌ها حاکی از آن بود که بیشترین تعداد پنجه بارور در کپه (۲۰/۰۳ عدد) با اعمال تیمار T14 در منطقه آمل به‌دست آمد و با عدم مصرف سیلیس و روی در این منطقه، صفت مذکور به میزان ۲۷/۴۵ درصد کاهش یافت. در منطقه نور حداکثر تعداد پنجه بارور در کپه (۱۸/۴۷ عدد) با کاربرد تیمار T13 حاصل شد. نتایج نشان داد که کاربرد ترکیبی سیلیس و روی به‌صورت خاک-مصرف (T4) منجر به افزایش معنی‌دار تعداد پنجه بارور در کپه نسبت به مصرف خاکی سیلیس (T2) و روی (T3) در منطقه آمل شد ولی در منطقه نور اختلاف معنی‌داری ایجاد نشد. این نتیجه ممکن است به دلیل نوع بافت خاک مکان‌های اجرای آزمایش باشد به گونه‌ای که کاربرد انفرادی کود روی به صورت خاک-مصرف در آمل با توجه به رسی بودن خاک منطقه منجر به تثبیت روی شده و برای گیاه قابل استفاده نبوده است به همین دلیل تغییر معنی‌داری در تعداد پنجه بارور در کپه در مقایسه با شاهد ایجاد نشد، اما زمانی که کود روی با سیلیس به شکل ترکیبی مورد استفاده قرار گرفت تعداد پنجه بارور به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که ناشی از اثرات مثبت سیلیس در فراهمی عنصر روی برای گیاه برنج می‌باشد. بهبود رشد و افزایش غلظت روی در ریشه و اندام هوایی برنج با کاربرد سیلیس در نتایج سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Wang *et al.*, 2015). در روش محلول‌پاشی نانوذرات، اختلاف معنی‌داری بین مصرف ترکیبی نانوسیلیس و نانوروی (T13) و کاربرد جداگانه نانوسیلیس (T5) در هر دو مکان آزمایش مشاهده گردید ولی اختلاف معنی‌داری بین کاربرد ترکیبی دو عنصر (T13) و مصرف انفرادی نانوروی (T9) وجود نداشت (جدول ۷). کاربرد روی به هر دو روش محلول‌پاشی و خاک-مصرف به‌واسطه افزایش غلظت روی در گیاه منجر به افزایش تعداد پنجه‌های مؤثر در متر مربع می‌گردد (Farooq *et al*., 2018). عنصر روی از طریق افزایش جذب و فراهمی سایر عناصر غذایی ضروری گیاه و هم‌چنین بهبود فرآیند متابولیکی گیاه منجر به بهبود رشد و افزایش تعداد پنجه بارور در برنج می‌گردد (Naik and Das, 2007). گزارش شده که مصرف مناسب سیلیس در افزایش تعداد پنجه برنج بسیار مؤثر می‌باشد به گونه‌ای که با کاربرد سه میلی‌مولار سیلیس، تعداد پنجه جدود ۱۹ درصد در مقایسه با شاهد افزایش یافت (Zia *et al*., 2017).

جدول ۷- اثر متقابل مکان و تیمارهای آزمایش بر تعداد پنجه بارور در کپه و تعداد دانه پر در خوشه برنج (مناطق آمل و نور)

Table 7- Interaction effect of location and experimental treatments on fertile tiller number per hill and filled grain number per panicle of rice (Amol and Nour Regions)

تیمارها Treatments	تعداد پنجه بارور در کپه No. of fertile tillers hill^{-1}		تعداد دانه پر در خوشه No. of filled grain panicle^{-1}	
	Amol	Nour	Amol	Nour
T1	14.53	13.13	83.77	81.53
T2	15.77	15.03	89.40	88.03
T3	15.70	16.03	93.37	87.60
T4	18.07	16.57	89.60	97.07
T5	15.63	15.90	98.80	85.80
T6	17.50	15.53	91.47	100.0
T7	19.00	16.50	90.83	94.10
T8	19.73	16.73	86.10	95.00
T9	17.07	16.50	92.83	90.93
T10	19.50	16.37	95.60	94.40
T11	16.97	17.07	90.93	83.50
T12	16.10	17.13	94.50	88.93
T13	18.87	18.47	96.23	93.90
T14	20.03	17.70	91.47	95.50
T15	15.97	17.83	92.00	90.23
T16	16.33	18.00	94.17	87.37
$LSD_{0.05}$	2.056		8.671	

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

Means followed by similar letters in each column are not significantly different at 5% level of probability according to LSD test.

تعداد دانه پر در خوشه

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد تعداد دانه پر در خوشه تحت تأثیر مکان‌های آزمایش قرار نگرفت ولی اثرات تیمارهای آزمایش و هم‌چنین اثر متقابل دوگانه تیمارهای آزمایش و مکان بر صفت یاد شده در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین اثرات متقابل مکان و تیمارهای آزمایش نشان داد که حداکثر تعداد دانه پر در خوشه با میانگین ۱۰۰ عدد دانه پر در هر خوشه با اعمال تیمار T6 در منطقه نور حاصل شد و با عدم مصرف

سیلیس و روی در این منطقه، صفت مذکور حدود ۱۸/۴۷ درصد کاهش یافت. در منطقه آمل بیشترین تعداد دانه پر در خوشه با میانگین ۹۶/۲۳ دانه پر با اعمال تیمار T13 به‌دست آمد و تحت شرایط شاهد به میزان ۱۲/۹۴ درصد از صفت یاد شده کاسته گردید. مصرف ترکیبی سیلیس و روی به صورت خاک-مصرف (T4) برتر از کاربرد جداگانه سیلیس (T2) و روی (T3) به روش خاک-مصرف از نظر تعداد دانه پر در خوشه در منطقه نور بود ولی در منطقه آمل اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. در روش محلول‌پاشی نانوذرات، استفاده ترکیبی از سیلیس و روی (T13) برتری معنی‌داری بر کاربرد سیلیس (T5) و روی (T9) به‌صورت جداگانه در هیچ‌یک از مکان‌های آزمایش از نظر تعداد دانه پر در خوشه نداشت (جدول ۷). سیلیس از طریق افزایش باروری خوشه‌ها سبب افزایش عملکرد دانه برنج می‌گردد (Tamai and Ma, 2008). افزایش معنی‌دار تعداد دانه در خوشه با افزایش کاربرد سیلیس در نتایج سایر محققان نیز گزارش شده است (Cuong *et al*., 2017). گزارشات حاکی از آن است که مصرف ۲ میلی‌مولار سیلیس در طول مراحل رشد زایشی برنج (شروع خوشه‌دهی تا خوشه‌دهی کامل) منجر به افزایش تعداد دانه پر در خوشه برنج گردید (Lavinsky *et al*., 2016).

وزن هزار دانه

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه مرکب مکان‌های آزمایش مشخص گردید که وزن هزار دانه تحت تأثیر هیچ‌یک از تیمارهای مورد بررسی قرار نگرفت (جدول ۵). وزن هزار دانه یک صفت ژنتیکی است و با توجه به اینکه اندازه دانه در برنج به‌وسیله پوسته کنترل می‌شود تغییرات این صفت زیاد نیست (Saha *et al*., 1998). گزارش شده که مصرف درصدهای مختلف سیلیس اثر معنی‌داری بر وزن هزار دانه نداشت (Kim *et al*., 2012)، که با نتایج آزمایش حاضر مطابقت دارد. در مقابل طی تحقیقات انجام شده توسط برخی پژوهشگران نشان داده شد که مصرف کود روی از منابع مختلف اثر معنی‌داری بر وزن هزار دانه برنج داشت (Shivay *et al*., 2016).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه مرکب مکان‌های آزمایش نشان داد اثر مکان و اثر متقابل مکان و تیمارهای آزمایش بر عملکرد دانه معنی‌دار نبود ولی اثرات تیمارهای آزمایشی بر عملکرد در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین اثرات تیمارهای آزمایش نشان داد که کاربرد هر دو عنصر سیلیس و روی به‌طور معنی‌داری منجر به افزایش عملکرد دانه نسبت به شاهد شد، برای مثال محلول‌پاشی نانوسیلیس + کاربرد خاکی سیلیس + کاربرد خاکی روی (T8)، محلول‌پاشی نانوسیلیس + محلول‌پاشی نانوروی (T13) و محلول‌پاشی نانوسیلیس + محلول‌پاشی نانوروی + کاربرد خاکی سیلیس (T14) به‌ترتیب سبب افزایش ۲۰/۶، ۲۱/۴ و ۲۱/۷ درصدی عملکرد دانه در مقایسه با عدم مصرف سیلیس و روی شدند. تمام تیمارهای مورد بررسی به‌جز تیمارهای شاهد (T1) و کاربرد جداگانه سیلیس به روش خاک-مصرف (T2) از نظر عملکرد دانه دارای اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نبودند. در پژوهش حاضر هیچ اختلاف معنی‌داری بین دو عنصر مورد استفاده در آزمایش (کاربرد خاکی سیلیس در مقایسه با مصرف خاکی روی و محلول‌پاشی سیلیس در مقایسه با محلول‌پاشی روی) از نظر عملکرد وجود نداشت. همچنین در بین روش‌های مورد استفاده در آزمایش، اختلاف معنی‌داری بین کاربرد خاکی سیلیس و روی با محلول‌پاشی نانوسیلیس و نانوروی از نظر عملکرد مشاهده نگردید (جدول ۶). افزایش عملکرد دانه برنج با مصرف عناصر روی و سیلیس به هر دو روش محلول‌پاشی نانوذرات و خاک-مصرف را می‌توان به فراهمی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، بهبود فرآیند جذب و انتقال عناصر به اندام هوایی و دانه مرتبط دانست. کاربرد روی با استفاده از هر دو روش محلول‌پاشی و خاک-مصرف در بهبود عملکرد دانه و افزایش سودآوری در سیستم‌های مختلف کشت برنج مناسب می‌باشد (Farooq *et al*., 2018). گزارش شده که تأمین روی از طریق خاک (پایه) + دو مرحله محلول‌پاشی بیشترین تأثیر را در افزایش غلظت روی در برنج با تولید عملکرد دانه مطلوب به همراه دارد (Saha *et al*., 2017)، که نتایج آزمایش حاضر را تأیید می‌نماید. مصرف روی سبب تخصیص مقادیر بیشتری از عناصر غذایی به بخش‌های زایشی گیاه نظیر خوشه‌ها و نهایتاً افزایش تجمع ماده خشک کل می‌گردد (Amanullah and Inamullah, 2016). غلظت روی دانه برنج رابطه مثبتی با عملکرد دانه دارد و افزایش مصرف روی در واریته‌هایی که غلظت روی در دانه کمتری دارند به‌طور معنی‌داری سبب افزایش جذب روی و نهایتاً عملکرد دانه می‌گردد (Jaksomsak *et al*., 2017). مصرف ۲ میلی‌مولار سیلیس در مرحله رشد زایشی برنج سبب افزایش ۴۵ درصدی عملکرد دانه نسبت به عدم مصرف آن در این مرحله رشدی گردید (Lavinsky *et al*., 2016). همچنین افزایش عملکرد دانه برنج به‌واسطه افزایش رشد، اجزای عملکرد و جذب بهتر عناصر غذایی با افزودن سیلیس در نتایج سایر پژوهشگران ارائه گردیده است (Cuong *et al*., 2017). مصرف سیلیس به‌خصوص در مراحل زایشی سبب افزایش تعداد پنجه بارور در کپه، درصد خوشه‌چه‌های پر و در نهایت بهبود عملکرد دانه برنج می‌گردد (Tamai and Ma, 2008).

غلظت و جذب سیلیس در دانه برنج

نتایج جدول تجزیه واریانس حاکی از آن بود که میزان غلظت و جذب سیلیس دانه تحت تأثیر تیمارهای آزمایش (P<۰/۰۱) معنی‌دار شد ولی اثر مکان و اثر متقابل مکان و تیمارهای آزمایشی بر صفات یاد شده معنی‌دار نگردید (جدول ۸). مقایسه میانگین اثرات تیمارهای آزمایش نشان داد که بیشترین میزان غلظت و جذب سیلیس در دانه

به‌ترتیب با میانگین‌های ۶/۴۰ درصد و ۲۹۷ کیلوگرم در هکتار با اعمال تیمار T14 به‌دست آمد، اگرچه میزان جذب سیلیس دانه در تیمار T8 (۲۹۰/۸ کیلوگرم در هکتار) در سطحی برابر با تیمار T14 قرار داشت. استفاده از سیلیس به‌صورت جداگانه یا ترکیبی به هر دو روش محلول‌پاشی و خاک-مصرف سبب فراهمی غلظت‌های بالای سیلیس در دانه برنج شد و میزان جذب سیلیس در دانه نیز به‌جز کاربرد جداگانه سیلیس به روش خاک-مصرف (T2) مشابه با شرایط درصد غلظت سیلیس در دانه بود (جدول ۹). نتایج حاصله نشان داد تأمین سیلیس گیاه از طریق محلول‌پاشی نانوذرات همراه با کاربرد خاکی این عنصر در افزایش میزان سیلیس گیاه بسیار مؤثر بود و افزودن عنصر روی به این ترکیبات نیز تا حدودی منجر به بهبود غلظت و جذب سیلیس در گیاه گردید. گزارش شده که با افزایش سطوح سیلیسیم، سیلیس دانه برنج به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (Dhamapurkar *et al.*, 2011). بررسی‌های به‌دست آمده توسط یزدپور و همکاران (Yazdpour *et al.*, 2014) طی دو سال زراعی نشان داد که بیشترین میزان جذب سیلیس دانه برنج در هر دو سال زراعی با محلول‌پاشی نانوسیلیکون به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده توسط گروه دیگری از پژوهشگران نیز نشان داد که با افزایش مصرف سیلیس از سطح صفر به سه میلی‌مولار، غلظت سیلس در ریشه و اندام هوایی به‌ترتیب حدود ۴۸ و ۴۲ درصد افزایش یافت (Zia *et al.*, 2017).

جدول ۸- تجزیه واریانس مرکب غلظت و جذب سیلیس و روی دانه برنج تحت تأثیر تیمارهای آزمایش

Table 8- Combined analysis of variance for Si and Zn concentration and uptake of rice grain affected by experimental treatments

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی d.f	غلظت سیلیس دانه Si concentration in grain	جذب سیلیس دانه Si uptake in grain	غلظت روی دانه Zn concentration in grain	جذب روی دانه Zn uptake in grain
مکان (Location)	1	0.3^{ns}	6171.3^{ns}	18.2^{ns}	2583.3^{*}
خطا (Error)	4	0.2	1347.4	8.03	199.4
تیمار (Treatment)	15	1.5^{**}	6927.5^{**}	131.6^{**}	3696.6^{**}
مکان × تیمار (L×T)	15	0.05^{ns}	688.1^{ns}	1.6^{ns}	165.6^{ns}
خطا (Error)	60	0.5	1447.9	14.6	390.7
ضریب تغییرات CV (%)	-	13.1	15.3	13.2	15.8

ns، * و **: به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

ns, * and **: Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively

جدول ۹- مقایسه میانگین غلظت و جذب سیلیس و روی دانه برنج تحت تأثیر تیمارهای آزمایش

Table 9- Mean comparison of Si and Zn concentration and uptake of rice grain under the influence of experimental treatments

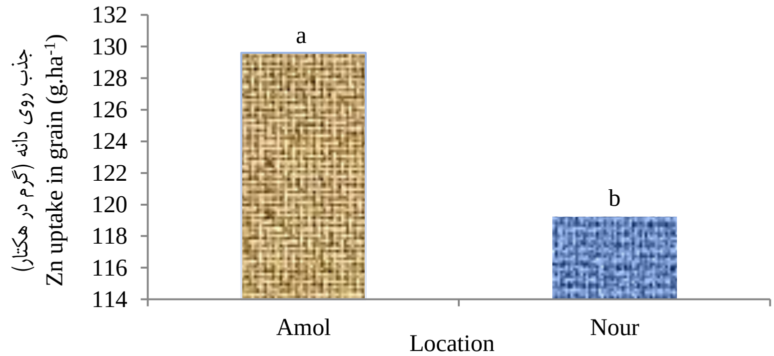
تیمارها Treatments	غلظت سیلیس دانه Si concentration in grain (%)	جذب سیلیس دانه Si uptake in grain (kg ha^{-1})	غلظت روی دانه Zn concentration in grain (mg kg^{-1})	جذب روی دانه Zn uptake in grain (g ha^{-1})
T1	4.70	169.3	16.92	62.67
T2	5.55	218.9	22.62	88.50
T3	5.01	201.7	26.95	108.8
T4	5.70	250.3	29.40	129.0
T5	5.81	247.3	23.85	97.33
T6	6.15	261.2	24.65	105.2
T7	5.95	266.0	30.00	132.7
T8	6.35	290.8	30.75	140.0
T9	5.16	219.8	31.15	131.8
T10	5.63	252.1	31.35	140.7
T11	5.16	221.0	31.60	134.5
T12	5.85	246.0	32.65	136.2
T13	5.95	277.3	32.42	148.8
T14	6.40	297.0	32.65	151.2
T15	6.11	262.0	32.85	139.8
T16	6.38	276.5	33.30	143.2
$LSD_{5\%}$	1.224	62.15	6.248	32.28

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند

Means followed by similar letters in each column are not significantly different at 5% level of probability according to LSD test

غلظت و جذب روی در دانه برنج

نتایج مربوط به جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد میزان غلظت و جذب روی در دانه برنج تحت تأثیر تیمارهای آزمایش (P<۰/۰۱) قرار گرفت ولی اثرات متقابل مکان و تیمارهای آزمایش بر صفات مذکور معنی‌دار نشد. هم‌چنین اثر مکان فقط بر میزان جذب روی در دانه برنج (P<۰/۰۵) معنی‌دار شد (جدول ۸). نتایج مقایسه میانگین اثر مکان‌های آزمایش (شکل ۲) نشان داد که میزان جذب روی در دانه برنج در منطقه آمل حدود ۸/۰۲ درصد بیشتر از منطقه نور بود، که به نظر می‌رسد به دلیل انتقال بهتر این عنصر به دانه با توجه به مطلوب‌تر بودن شرایط آب و هوایی منطقه آمل از جمله درجه حرارت مناسب‌تر و بارندگی کمتر (جدول ۱) در طول دوره رشد گیاه در مقایسه با منطقه نور و هم‌چنین عملکرد دانه بالاتر در مکان آمل بوده باشد. بیشترین میزان غلظت روی در دانه برنج با میانگین ۳۳/۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم با کاربرد تیمار T16 حاصل شد، اگرچه با سایر تیمارهای مورد بررسی به‌جز T1، T2، T3، T5 و T6 اختلاف آماری معنی‌داری نداشت. کمترین میزان غلظت روی دانه نیز با حدود ۴۹/۱ درصد کاهش در شرایط شاهد (T1) مشاهده شد که با کاربرد جداگانه سیلیس به روش خاک-مصرف (T2) در یک گروه آماری قرار گرفت. نتیجه نشان داد که استفاده از روی به هر دو روش محلول‌پاشی نانوذرات و خاک-مصرف منجر به افزایش میزان غلظت روی در دانه نسبت به شاهد گردید. حداکثر میزان جذب روی در دانه برنج به‌ترتیب با میانگین‌های ۱۴۸/۸، ۱۵۱/۲ و ۱۴۳/۲ کیلوگرم در هکتار با اعمال تیمارهای T13، T14 و T16 به‌دست آمد و با عدم مصرف سیلیس و روی، میزان جذب حدود ۵۸/۵ درصد نسبت به بیشترین میزان جذب (تیمار T14) کاهش یافت (جدول ۹). در نتایجی مشابه گزارش شده که با مصرف کود روی از طریق خاک (به صورت پایه) + محلول‌پاشی در زمان‌های حداکثر پنجه‌زنی و گلدهی، غلظت روی در دانه برنج حدود ۴۷ درصد در مقایسه با شاهد افزایش یافت (Saha *et al.*, 2017). نتایج به‌دست آمده توسط سایر پژوهشگران نیز نشان داد که با کاربرد روی به هر دو روش محلول‌پاشی و خاک-مصرف، غلظت روی در دانه در سیستم‌های مختلف کاشت برنج در مکان‌های مورد آزمایش افزایش یافت (Farooq *et al.*, 2018). در نتایجی دیگر گزارش شده که در بین روش‌های مختلف کاربرد روی، محلول‌پاشی روی طی سه مرحله از رشد گیاه سبب جذب بیشتر روی در دانه نسبت به محلول‌پاشی یکباره و کاربرد خاکی روی گردید (Shivay *et al.*, 2016). نتایج سایر محققان نیز مؤید این مطلب است که کاربرد روی سبب افزایش غلظت روی در بافت گیاه و هم‌چنین عملکرد دانه برنج می‌گردد (Dwivedi and Srivastva, 2014; Tuyogon *et al.*, 2016).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر مکان بر میزان جذب روی در دانه برنج

Figure 2- Mean comparison of the effect of location on Zn uptake in rice grain

نتیجه‌گیری

با توجه به بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش معنی‌دار عملکرد دانه با کاربرد روی و سیلیس در مکان‌های مورد آزمایش، می‌توان یکی از دلایل کاهش عملکرد در این مناطق را به کمبود و عدم دسترسی به این عناصر مغذی نسبت داد. نتایج نشان داد که اگرچه کاربرد انفرادی روی به صورت خاک-مصرف (T3) در منطقه آمل به دلیل رسی بودن بافت خاک و در نتیجه امکان جذب و فراهمی پایین‌تر این عنصر برای گیاه سبب بهبود تعداد پنجه بارور در کپه در مقایسه با شاهد نگردید ولی مصرف ترکیبی روی و سیلیس به‌صورت خاک-مصرف (T4) و هم‌چنین محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی به‌خصوص در تیمارهای ترکیبی با سیلیس موجب افزایش فراهمی روی و در نهایت افزایش معنی‌دار تعداد پنجه بارور در منطقه آمل شد. استفاده از سیلیس و روی به‌صورت ترکیبی با روش خاک-مصرف منجر به بهبود تعداد پنجه بارور در آمل و افزایش تعداد دانه پر در خوشه در نور در مقایسه با کاربرد انفرادی هر یک از عناصر سیلیس و روی گردید. محلول‌پاشی هم‌زمان نانوذرات سیلیس و روی سبب بهبود تعداد پنجه بارور در کپه در مکان‌های آزمایش نسبت به مصرف جداگانه نانوسیلیس شد. وجود شرایط آب و هوایی مناسب‌تر در منطقه

آمل در طول دوره رشد گیاه باعث بهبود جذب روی در دانه به‌ویژه با استفاده از روش محلول‌پاشی برگی نانوذرات در مقایسه با منطقه نور گردید. استفاده از سیلیس و روی به هر دو روش محلول‌پاشی نانوذرات و خاک-مصرف منجر به بهبود عملکرد دانه نسبت به شاهد گردید، به گونه‌ای که کاربرد ترکیبی سیلیس و روی به‌صورت نانوذرات (T13) و خاک-مصرف (T4) به‌ترتیب سبب افزایش ۲۱/۴ و ۱۶/۹ درصدی عملکرد در مقایسه با عدم مصرف سیلیس و روی (T1) شد. عناصر مورد استفاده در آزمایش برتری معنی‌داری بر یکدیگر از نظر عملکرد دانه تولیدی نداشتند ولی کاربرد روی اثر بهتری بر غلظت و جذب روی در دانه در مقایسه با مصرف سیلیس داشت. بین روش‌های محلول‌پاشی نانوذرات و خاک-مصرف اختلاف معنی‌داری از نظر عملکرد، اجزای عملکرد و جذب سیلیس و روی در دانه وجود نداشت. بنابراین با توجه به نتایج این پژوهش، استفاده از سیلیس و روی به هر دو روش محلول‌پاشی نانوذرات و خاک-مصرف جهت بهبود عملکرد دانه و افزایش غلظت و جذب عناصر آزمایش مؤثر می‌باشد. لذا نیاز به توجه بیشتر به تغذیه روی و سیلیس گیاه برنج در خاک‌هایی با قابلیت دسترسی پایین به این عناصر می‌باشد.

References

1. Alharby, H. F., Metwali, E. M. R., Fuller, M. P., and Aldhebiani, A. Y. 2016. Impact of application of zinc oxide nanoparticles on callus induction, plant regeneration, element content and antioxidant enzyme activity in tomato (*Solanumlycopersicum* L.) under salt stress. Archives of Biological Sciences 68 (4): 723-735.
2. Amanullah., and Inamullah. 2016. Dry matter partitioning and harvest index differ in rice genotypes with variable rates of phosphorus and zinc nutrition. Rice Science 23 (2): 78-87.
3. Anzer-Alam, M. D., and Kumar, M. 2015. Effect of zinc on growth and yield of rice var. Pusa Basmati-1 in Saran district of Bihar. Asian Journal of Plant Science and Research 5 (2): 82-85.
4. Cuong, T. X., Ullah, H., Datta, A., and Hanh, T. C. 2017. Effects of silicon-based fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of rice in tropical zone of Vietnam. Rice Science 24 (5): 283-290.
5. Dhamapurkar, V. B., Talashilkar, S. C., and Sonar, K. R. 2011. Effect of calcium silicate slag on yield and silica uptake by rice. Proceedings of The 5th International Conference on Silicon in Agriculture. September 13-18. Beijing, China.
6. Dwivedi, R., and Srivastva, P. C. 2014. Effect of zink sulphate application and the cyclic incorporation of cereal straw on yields, the tissue concentration and uptake of Zn by crops and availability of Zn in soil under rice-wheat rotation. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture 3 (53): 1-12.
7. Emami, A. 1996. Methods of plant analysis. Vol 982. Soil and Water Research Institute. 130 p. (in Persian).
8. Farooq, M., Ullah, A., Rehman, A., Nawaz, A., Nadeem, A., Wakeel, A., Nadeem, F., and Siddique, K. H. M. 2018. Application of zinc improves the productivity and biofortification of fine grain aromatic rice grown in dry seeded and puddle transplanted production systems. Field Crops Research 216: 53-62.
9. Ghasemi, M., Noormohammadi, Gh., Madani, H., Mobasser, H. R., and Nouri, M. Z. 2017. Effect of foliar application of zinc nano oxide on agronomic traits of two varieties of rice (*Oryza sativa* L.). Crop Research 52 (6): 195-201.
10. Ghasemi Lemraski, M., Normohamadi, Gh., Madani, H., Heidari Sharifabad, H., and Mobasser, H. R. 2014. Effect of silicon and potassium foliar application and nitrogen rates on yield and yield components of Iranian rice cultivars, Tarom Hashemi and Tarom Mahalli. Journal of New Finding in Agriculture 9: 47-66. (in Persian).
11. Jaksomsak, P., Rerkasem, B., and Thai, C. P. U. 2017. Response of grain zinc and nitrogen concentration to nitrogen fertilizer application in rice varieties with high-yielding low-grain zinc and low-yielding high grain zinc concentration. Plant and Soil 411 (1-2): 101-109.
12. Jeer, M., Telugu, U. M., Voleti, S. R., and Padmakumari, A. P. 2017. Soil application of silicon reduces yellow stem borer, scripophage incertulas (Walker) damage in rice. Journal of Applied Entomology 141 (3): 189-201.
13. Kheyri, N., and Mobasser, H. R. 2016. Effect of seedling age and seeding rate in nursery on some agronomic traits and seed yield of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Tarom Hashemi. Journal of Crop Ecophysiology 10 (2): 431-446. (in Persian with English abstract).
14. Kim, Y. H., Khan, A. L., Shinwari, Z. K., Kim, D. H., Waqas, M., Kamran, M., and Lee, I. J. 2012. Silicon treatment to rice (*Oryza sativa* L. cv Gopumbyeo) plants during different growth periods and its effects on growth and grain yield. Pakistan Journal of Botany 44 (3): 891-897.
15. Lavinsky, A. O., Detmann, K. C., Reis, J. V., Avila, R. T., Sanglard, M. L., Pereira, L. F., Sanglard, L. M. V. P., Rodrigues, F. A., Araujo, W. L., and DaMatta, F. M. 2016. Silicon improves rice grain yield and photosynthesis specifically when supplied during the reproductive growth stage. Journal of Plant Physiology 206: 125-132.
16. Longping, Y. 2004. Hybrid rice for food security in the world. FAO Rice Conference Rome, Italy. 12-13.
17. Lou, Y. S., Wu, L., Lixuan, R., Meng, Y, Shidi, Z., and Huaiwei, Z. 2016. Effects of silicon application on diurnal variations of physiological properties of rice leaves of plants at the heading stage under elevated UV-B radiation. International Journal of Biometeorology 60 (2): 311-318.

18. Mahmoud, E., Abdel-Haliem, F., Hegazy, H. S., Hassan, N. S., and Naguib, D. M. 2017. Effect of silica ions and nano silica on rice plants under salinity stress. Ecological Engineering 99: 282-289.
19. Mazaherinia, S., Astaraei, A. R., Fotovat, A., and Monshi, A. 2010. Effect of nano iron oxide particles on Fe, Mn, Zn and Cu concentrations in wheat plant. Journal of World Applied Sciences 7 (1): 156-162.
20. Meena, V. D., Dotaniya, M. L., Coumar, V., Rajendiran, S., Ajay, Kundu, S., and Rao, A. S. 2014. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences 84 (3): 505-518.
21. Naik, S. K., and Das, D. K. 2007. Effect of split application of zinc on yield of rice (*Oryza sativa* L.) in an inceptisol. Archives of Agronomy and Soil Science 53 (3): 305-313.
22. Rezaei, R., Hosseini, S. M., Shabanali Fami, H., and Safa, L. 2009. Identification and analysis of the barriers of nanotechnology development in the iranian agricultural sector from the viewpoint of the researchers. Journal of Science and Technology Policy 2 (1): 17-26. (in Persian with English abstract).
23. Saha, A., Sarkar, R. K., and Yamagishi, Y. 1998. Effect of time of nitrogen application on spikelet differentiation and degeneration of rice. Botanical Bulletin of Academia Sinica 39: 119-123.
24. Saha, S., Chakraborty, M., Padhan, D., Saha, B., Murmu, S., Batabyal, K., Seth, A., Hazra, G. C., Mandal, B., and Bell, R. W. 2017. Agronomic biofortification of zinc in rice: influence of cultivars and zinc application methods on grain yield and zinc bioavailability. Field Crops Research 210: 52-60.
25. Sainz, M. J., Taboada-Castro, M. T., and Vilarino, A. 1998. Growth, mineral nutrition and mycorrhizal colonization of red clover and cucumber plants grown in a soil amended with composted urban wastes. Plant and Soil 205 (1): 85-92.
26. Shivay, Y. S., Prasad, R., Kaur, R., and Pal, M. 2016. Relative efficiency of zinc sulphate and chelated zinc on zinc biofortification of rice grains and zinc use-efficiency in Basmati rice. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B, Biological Sciences 86 (4): 973-984.
27. Tamai, K., and Ma, J. F. 2008. Reexamination of silicon effects on rice growth and production under field conditions using a low silicon mutant. Plant and Soil 307: 21-27.
28. Tiong, J., McDonald, G. K., Genc, Y., Pedas, P., Hayes, J. E., Toubia, J., Langridge, P., and Huang, C. Y. 2014. HvZIP7 mediates zinc accumulation in barley (*Hordeum vulgare*) at moderately high zinc supply. New Phytologist 201 (1): 131-143.
29. Tuyogon, D. S. J., Impa, S. M., Castillo, O. B., Larazo, W., and Johnson-Beebout, S. E. 2016. Enriching rice grain zinc through zinc fertilization and water management. Soil Science Society of America Journal 80 (1): 121-134.
30. Upadhyaya, H., Roy, H., Shome, S., Tewari, S., Bhattacharya, M. K., and Panda, S. K. 2017. Physiological impact of zinc nanoparticle on germination of rice (*Oryza sativa* L.) seed. Journal of Plant Science and Phytopathology 1: 062-070.
31. Wang, S., Wang, F., and Gao, S. 2015. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings. Environmental Science and Pollution Research 22 (4): 2837-2845.
32. Yazdpour, H. 2014. Role of nano-silicon and other silicon resources on uptake of nitrogen and phosphorus, lodging indics and quantitative and qualitative yield of rice (*Oryza sativa* L.). Ph.D thesis. Department of Agronomy. Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran. 275 P.
33. Yazdpour, H., Noormohamadi, Gh., Madani, H., Heidari Sharif Abad, H., Mobasser, H. R., and Oshri, M. 2014. Role of nano-silicon and other silicon resources on straw and grain protein, phosphorus and silicon contents in Iranian rice cultivar (*Oryza sativa* cv. Tarom). International Journal of Biosciences 5 (12): 449-456.
34. Yoshida, S. 1975. The physiology of silicon in rice. Food and Fertilizer Technology Center (FFTC), Technical Bulletin. 25: 1-27.
35. Yuvaraj, M., and Subramanian, K. S. 2014. Fabrication of zinc nano fertilizer on growth parameter of rice. Trends in Biosciences 7 (17): 2564-2565.
36. Zia, Z., Bakhat, H. F., Saqib, Z. A., Shah, G. M., Fahad, S., Ashraf, M. R., Hammad, H. M., Naseem, W., and Shahid, M. 2017. Effect of water management and silicon on germination, growth, phosphorus and arsenic uptake in rice. Ecotoxicology and Environmental Safety 144: 11-18.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 17, No. 3, Fall. 2019, p. 503-515

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸، ص. ۵۱۵-۵۰۳

Comparison of NPs Foliar Application of Silicon and Zink with Soil Application on Agronomic and Physiological Traits of Rice (*Oryza sativa* L.)

N. Kheyri[1*], H. Ajam Norouzi[2], H. R. Mobasser[3], B. Torabi[4]

Received: 10-04-2019
Accepted: 03-06-2019

Introduction

Among the nutrients, silicon (Si) and zinc (Zn) play a key role in improving plant nutrition and increasing rice (*Oryza sativa* L.) growth, because their deficiency reduces growth and yield. Si, as one of the most abundant soil elements, helps to increase the amount of photosynthesis, improve performance, prevent lodging, and reduce pests and diseases. Zn is one of the most important micronutrients involved in protein synthesis and carbohydrate metabolism. One of the most important uses of nanotechnology in various aspects of agriculture in the water and soil section is the application of nano-fertilizers for plant nutrition. Nano-fertilizers can increase the nutrients use efficiency, improve plant growth and reduce environmental impacts compared to traditional methods. The purpose of this research was to evaluate the effect of Si and Zn by two forms of nanoparticles (NPs) foliar application and soil application in order to increasing the nutrient uptake efficiency and improving the rice grain yield.

Materials and Methods

This experiment was conducted as a randomized complete block design (RCBD) with 16 treatments and three replications in two locations of Mazandaran province (Amol and Nour) in 2016. The treatments included two forms of Si and Zn application: foliar application (nanoparticles source) and soil application (common source) as individually or mixtures treatments. For soil application, Si fertilizer was applied at the rate of 400 kg Ca_2SiO_4 ha^{-1} and Zn fertilizer at the rate of 40 kg $ZnSO_4$ ha^{-1} as basal in experimental plots. Foliar application of nano-SiO_2 and nano-ZnO in the concentration of 50 mg L^{-1} was applied at four plant growth stages (early tillering, middle tillering, panicle initiation and full heading stage) in plots. At the end of season, some yield components, grain yield as well as the concentrations and uptake of Si and Zn in grain were determined. The combined analysis of experimental data were done by using MSTAT-C software. The means were compared using the LSD test at 5% of probability level.

Results and Discussion

The results revealed that yield components, yield and concentration and uptake of experimental elements in rice grain were significantly increased by Si and Zn application in both methods of NPs foliar application and soil application compared to the control. In the case of soil application of the elements, combined use of Si and Zn was never statistically superior to use of only Zn in terms of yield, concentrations and uptake of test elements, but there was a significant difference in the sole application of Si in terms of panicle length and Zn concentration and uptake in rice grain. The combined application of Si and Zn as soil was statistically superior to the separate application of both elements in terms of fertile tillers per hill at Amol and filled grains per panicle at Nour site. In the case of NPs foliar application, combined use of Si and Zn was not statistically superior to use of only Zn in terms of yield and all other studied parameters, but superior to the separately use of Si for fertile tillers number in both experimental sites and Zn concentration and uptake in rice grains.

Conclusions

The Zn application had a better effect on Zn concentration and uptake in grain compared with Si, but there was no significant difference between Si and Zn application in terms of grain yield. There was no significant difference between the methods used in this experiment in terms of grain yield and concentration and uptake of

1- Ph.D. Graduated, Department of Agronomy, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran
2- Assistant Professor, Department of Agronomy, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran
3- Assistant Professor, Department of Agronomy, Ghaemshahr Branch, Islamic Azad University, Ghaemshahr, Iran
4- Associate Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
(*- Corresponding Author Email: norollah.kheyri@yahoo.com)

Si and Zn in grain. Therefore, according to the results of this research, NPs foliar spray and soil application of Si and Zn is effective way for increasing concentration and uptake of test elements and as well as improving rice grain yield in soils having low-availability of these two nutrients.

Keywords: Application method, Application source, Elements uptake, Grain yield, Nanofertilizer